

大気中における二酸化炭素の分布と変動に関する研究

著者	青木 周司
号	860
発行年	1984
URL	http://hdl.handle.net/10097/24605

氏名・(本籍)	あおきしゅうじ 青木周司
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 860 号
学位授与年月日	昭 和 59 年 3 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学位論文題目	大気中における二酸化炭素の分布と変動に関する研究
論文審査委員	(主査) 教 授 田 中 正 之 教 授 上 山 弘 教 授 近 藤 純 正 助 教 授 安 田 延 寿

論 文 目 次

第 I 章 序 論

第 II 章 高精度二酸化炭素測定システム

1. 緒 言
2. 非分散型赤外(NDIR)CO₂ 分析計
3. 標準ガス
4. フラスコサンプリング法
5. 計測システム
- 5-1. 連続観測
- 5-2. フラスコ採集試料の分析法
6. 測定精度

図表及びその解説

第 III 章 日本付近の対流圏及び下部成層圏における CO₂ 濃度の変動

1. 緒 言
2. 試料空気の採集法

3. 結果及び考察

3-1. CO₂ 濃度の不規則な変動

① 対流圏下層での CO₂ 濃度分布

② 対流圏中層及び上層における CO₂ 分布

3-2. 対流圏における CO₂ 濃度の年増加及びその変動

3-3. 対流圏における CO₂ 濃度の季節変化

3-4. 下部成層圏における CO₂ 濃度の変化

3-5. 対流圏での物質の鉛直輸送について

図表及びその解説

第IV章 CO₂ をトレーサーとした大気の南北輸送

1. 緒 言

2. 試料空気の採集法

3. 結果及び考察

3-1. CO₂ 濃度の緯度分布及びその季節変化

3-2. 大気の南北輸送モデル

図及びその解説

第V章 富士山頂における CO₂ 濃度の変動

1. 緒 言

2. 観測地点

3. 測器及び観測方法

4. 結果及び考察

図及びその解説

第VI章 仙台市郊外の丘陵地帯における CO₂ 濃度の変動

1. 緒 言

2. 観測地点及び観測方法

3. 結果及び考察

図及びその解説

謝 辞

参考文献

参考論文

1. Concentration of Atmospheric Carbon Dioxide over Japan.

2. High Quality Measurements of the Concentration of Atmospheric Carbon Dioxide.

論文内容要旨

I. 序

大気中の二酸化炭素には赤外領域に存在する強い吸収帯の働きによって地表面や下層の大気を保温する効果即ち温室効果があるために、その濃度増加に伴う気候の温暖化という問題が多くの人々の関心を集めている。ここ一世紀にわたる大気中の CO_2 濃度増加の主な原因は、化石燃料の消費によるものであるというのが一般的な見解である。ところで人間活動によって大気に加えられる CO_2 により、大気中の CO_2 濃度が今後どのように増加していくかを予測するためには、大気中の CO_2 のバックグラウンド濃度の監視を強化するとともに、 CO_2 の貯蔵庫である大気、植物圏及び海洋間の交換量を定量的に把握しておく必要がある。このような観点から、世界中のさまざまな場所で CO_2 濃度の観測が行なわれてきた。しかし現在活動している CO_2 モニタリングステーションは世界中でも30~40地点にすぎず、しかも欧米に偏在しており、本研究を開始する前まではアジア地域には皆無であった。また北半球中緯度地帯には人間活動が集中しており、自然的な Source と Sink の活動も強いいため、 CO_2 濃度の変動が他の地域に比べてかなり大きいと期待される。このため、地球規模での CO_2 の分布及び変動を知るためには特にこの緯度帯において空間的にも時間的にも密度が高く、かつ質のよいデータをとる必要がある。さらに大気中の CO_2 濃度の分布と変動を明らかにするもう一つの目的は、それらから大気の輸送過程に関する情報を導くことにある。 CO_2 をトレーサーとして用いる利点は、大気中を輸送される過程で化学反応によって変質を受けたり、降雨によって除去されるようなことがないこと、及び極めて高い精度で測定が可能であることであり、それだけ正確な情報を得ることができる。

II. 高精度二酸化炭素測定システム

本研究においては、大気中の CO_2 濃度の精密測定を行なうために、市販されている非分散型赤外(NDIR)分析計のさまざまな部分に独自の改良を加え、連続観測システム及びフラスコサンプル分析システムを製作した。測定精度はともに他の観測ステーションと同等かそれ以上($\pm 0.05\text{ppm}$ 以下)である。NDIR 分析計を用いた分析法は相対測定法であるため絶対検定システムで濃度づけされた標準ガスが必要となる。本研究では重量法を利用してキャリアーガス効果の補正を要しない空気をベースガスとした新たな標準ガスシステム(絶対精度 $\pm 0.3\text{ppm}$ 以下)を確立した。さらにフラスコ内に長期保存された試料空気の変質及び試料採集時にフラスコ内に混入した水滴が CO_2 濃度の測定に与える影響についても詳細に検討を加え、そのような現象が起こらぬよう対策を講じた。これらの観測技術を用いて次に述べる各種の観測研究を行なった。

III. 日本付近の対流圏及び下部成層圏における CO_2 濃度の変動

日本付近の CO_2 のバックグラウンド濃度、及び対流圏から下部成層圏にかけての濃度の鉛直

分布を明らかにするため、1979年1月より1ヶ月に1回の割合で航空機を用いて試料空気を採集し、分析を行なった。対流圏下層では地上の Source や Sink の影響を受けやすいため、一般に CO₂ 濃度は変動が大きい、その鉛直分布は季節によって特定のパターンに分類できることが明らかになった。一方、対流圏の中層及び上層では CO₂ 濃度はかなり一様となっており、水平距離で数100kmから1000km程度の範囲内では濃度変動は標準偏差で0.4~0.6ppm 程度であった。CO₂ 濃度の不規則な時間空間変動は、主に前線や低気圧といった総観規模の大気擾乱によって引き起こされることも明らかになった。

対流圏における1979年から1983年までの5年間の平均的な CO₂ 濃度の増加率は1.3ppm/year と評価された。また CO₂ 濃度は明瞭な季節変化を示しており、対流圏下部では4月の初めに最高となり、8月中旬に最低となる。対流圏中部では4月の中旬から下旬にかけて最高となり、8月終わってから9月にかけて最低となる。対流圏上部では4月の終わってから5月にかけて最高となり、9月の中旬から下旬にかけて最低となる。その振巾は対流圏下部、中部、上部でそれぞれ14, 9, 8ppm であった。即ち対流圏では CO₂ 濃度の季節変化の振巾は上層ほど小さくなっており、またその位相が高度とともに若干遅れる傾向があることがわかった。その結果、大気中の CO₂ 濃度が減少傾向にある6月から9月までの期間には CO₂ 濃度は上層にいくほど高く、CO₂ 濃度が増加傾向を示す10月から翌年の5月までの期間には逆に CO₂ 濃度は下層ほど高くなっていた。観測された季節変化の振巾の減少及び位相の遅れに一次元輸送モデルを適用することによって、対流圏での鉛直方向の渦拡散係数は $1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ と求められた。さらに下部成層圏での CO₂ 濃度変動は対流圏とは全く様子が異なっていること及び成層圏内でも CO₂ 濃度の鉛直勾配が存在することも明らかになった。

IV. CO₂ をトレーサーとした大気の南北輸送

地球規模における緯度方向の CO₂ 分布及び大気による物質輸送に関する情報を得るために、外航船舶による観測も実施した。CO₂ の年平均濃度は北半球高緯度にピークをもち、南半球に向かって低下し、30° S以南で最低となっていた。最高濃度と最低濃度の差は3.5ppm であった。得られた濃度分布に緯度方向一次元の拡散モデルを適用することによって、対流圏下部での南北方向の渦拡散係数は $1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と求められた。また自然の Source と Sink 及び工業活動の Source の緯度分布も明らかにした。求められた渦拡散係数を用いて自然の Source によって引き起こされる低緯度から高緯度に向かう CO₂ のネットフラックスを評価した。すなわち $2 \times 10^{10} \text{ ton/year}$ の CO₂ が熱帯域で海洋から大気に放出され、これが南北の極方向に運ばれて再び海洋に吸収されることが明らかとなった。

次に CO₂ 濃度の緯度一季節変化についても考察を行なった。CO₂ 濃度の季節変化は北半球の高緯度ほど大きく、赤道付近の収束帯(SPCZ)以南ではほとんどみられなかった。また北半球の陸上植物活動によって生じた CO₂ 濃度の季節変化が時の経過とともに低緯度方向に伝わっていく様子が明らかになった。得られた季節変化に一次元拡散モデルを適用して、緯度と時間の

関数である自然の Source-Sink 強度を求めたところ、次のような事実が判明した。(1)北半球の中緯度から高緯度にかけて Source-Sink 強度が大きく、赤道付近及び南半球では大きな Source や Sink はみられない、(2)北半球の高緯度ほど Sink の期間が短く、極域では 6 月の初めから 8 月の終わりまでの約 3 ヶ月間である、(3) Sink が最も強まる時期は 45° N 以北では緯度によらず 7 月である、(4)一方 Source が最強となるのは極域では 9 月から 10 月にかけて、 30° N では 11 月から 12 月にかけてと低緯度になるにしたがって遅れる傾向にある。(4)の事実は高緯度ほど冬の訪れが早く、植物の呼吸作用や土壌の有機物の分解速度が温度に強く依存しているためと推定される。夏の期間に 30° N 以北で植物によってとり込まれる CO_2 量はほぼ 3.5×10^{10} ton であり、これは大気中の全 CO_2 量の 1.3% に相当する。

V. 富士山頂における CO_2 濃度の変動

1980 年秋と 1981 年夏から秋にかけて、日本における大気中の CO_2 濃度のバックグラウンド観測ステーションとして最適と思われる富士山頂において CO_2 濃度の観測を行なった。1980 年は 1 日 4 回の割合でフラスコに採集した空気試料を研究室に持ち帰って分析し、1981 年は連続観測システムを山頂に設置した。

まず富士山周辺のローカルな CO_2 の Source や Sink が山頂における CO_2 濃度変動に与える影響について検討を行なった。山頂で観測される風向と CO_2 濃度の間には系統的な関係が認められず、特に近くの工業地帯の影響は全く受けていないことが判明した。また植物活動が最も活発になる 7、8 月でも濃度変動のスペクトルには 1 日周期の変化が全く見られなかった。さらに富士山頂での CO_2 濃度と航空機観測の結果がきわめてよく一致していることも明らかとなった。これらの事実から富士山頂は大気中の CO_2 のバックグラウンド濃度の観測基地として極めて適していることが明らかとなった。

富士山頂では CO_2 濃度の日変化よりむしろ数日周期の不規則変動が明瞭にみられ、特に 7、8 月に顕著であった。スペクトル解析の結果、この不規則変動は大気圧及び露点温度の変動と高い相関があることがわかった。さらにトラジェクトリー解析を行ない、この不規則な変動は総観規模の気象現象に関係して山頂に到達する空気塊の起源の違いによって生じていることが明らかになった。

VI. 仙台市郊外の丘陵地帯における CO_2 濃度の変動

Source や Sink が近傍に存在する場所での CO_2 濃度の挙動を明らかにするため、山林地帯及び市街地が混在している仙台市郊外の青葉山において、1978 年 12 月から 1981 年 6 月までの 2 年半にわたり CO_2 の連続観測を実施した。暖候期には活発な植物活動を反映した日変化が最も卓越していたが、寒候期には日変化が小さくなり、むしろ 3～5 日周期の不規則変動が目立つようになった。この不規則変動は風速に関係の深い大気の安定度に支配されており、低気圧の動きと密接な関係にあることが判明した。

青葉山での CO₂ 濃度の季節変化はきわめて不規則であった。また、地表面での CO₂ 濃度は高度30m での値に比べ常にかなり高く、30m での CO₂ 濃度は航空機観測によって得られた下部対流圏の値に比べて常に高かった。さらに風速によってクラス分けされた CO₂ 濃度の季節変化は、風が強いほど低濃度となっていた。このような事実から考えて、青葉山付近では年間を通してかなりの CO₂ が地表から大気に放出されていることがわかった。

30m 高度で得られた CO₂ の日最低濃度から求められた濃度の年増加率は1.6ppm/year であり、航空機観測で求められた当該期間の値と殆ど一致した。季節変化も航空機観測で求められた下部対流圏のものとはほぼ同じであった。すなわち、両者とも振巾は約14ppm であり、4月の半ばに最高濃度が、8月の初めに最低濃度が出現した。しかし日最低濃度の年平均値を航空機観測によって得られた対流圏下部の結果と比較すると、前者の方が約1ppm 高くなっていた。

論文審査の結果の要旨

青木周司提出の論文は、大気中の二酸化炭素濃度の高精度の測定システムを開発し、それを用いて広域的な観測を実施して、二酸化炭素濃度の時間・空間分布とその変動の実態を明らかにし、かつ垂直および水平方向の輸送モデルを用いて結果の解釈を試みたものである。

まず、大気中の二酸化炭素濃度の測定に求められる高精度の測定システムを得るために、市販の非分散赤外分析計の多くの部分に独自の改良を加え、誤差 $\pm 0.05\text{ppm}$ 以下の連続観測システムおよび誤差 $\pm 0.01\text{ppm}$ のフラスコサンプル分析システムを製作する一方、精密重量法によって絶対精度 $\pm 0.3\text{ppm}$ 以下の空気をベースガスとした標準ガスシステムを確立しているが、これによって得られる測定精度は国際的にも特筆に値するものである。

次に、この測定システムを用い、仙台市青葉山、富士山頂、沖縄海洋博記念施設アクアポリスでの連続観測、仙台付近の下部対流圏での航空機によるフラスコサンプリング、札幌―那覇間の日本上空対流圏中・上部でのフラスコサンプリング、および日本―オーストリア間往復の船舶上でのフラスコサンプリングを定期的に実施した。その結果、大気中の二酸化炭素濃度は、対流圏下部では地上のsourceやsinkの影響を強く受けて大きな変動を示すが、その鉛直分布は季節によって特定のパターンに分類できること、一方対流圏中・上部では二酸化炭素濃度は空間的にかなり一様なものとなり、水平距離1000km程度の範囲にわたっての濃度変動は標準偏差0.4~0.6ppm程度となること、二酸化炭素濃度の不規則な時間・空間変動の多くが前線や低気圧などの総観規模の大気擾乱と関連づけられることが明らかとなった。さらに対流圏各高度での二酸化炭素濃度の季節変化の実態、二酸化炭素濃度の緯度・季節変化の実態も明らかにされた。人間活動に伴う大気中の二酸化炭素濃度の年々の増加傾向も詳細に検出された。1979年1月から1983年12月までの平均増加率は 1.3ppm/yr と見積られた。

最後に、これらの観測データを大気の輸送モデルに組み入れて解析することにより、自然のおよび人為的な二酸化炭素のsourceやsinkの分布の概要も明らかにされている。

以上のように青木周司提出の論文は、大気中の二酸化炭素の広域的な分布と変動の特性を明らかにしたもので、当人が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって青木周司提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。